

Punktwolken von Handscannern und ihr Potenzial

Thomas Martienßen

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie

ZUSAMMENFASSUNG:

Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit dem Handscannern ZEB-REVO der Firma GeoSLAM. Es werden die Handhabung der Hardware im untertägigen Einsatz und die Weiterverarbeitung der Punktwolken für Anwendungen im Bergbau näher betrachtet. Die Notwendigkeit der Referenzierung der Punktwolken und eine Möglichkeit diese umzusetzen, werden dargelegt. Über den Vergleich der Daten mit Punktwolken von terrestrischen Laserscannern der Firma Riegl in der Software RiScanPro werden Genauigkeitsuntersuchungen angestellt, die dem Anwender die Grenzen des Systems aufzeigen. Schließlich führen die angestellten Untersuchungen zu einer kritischen Bewertung des Systems.

ABSTRACT:

This contribution addresses practical aspects, abilities and limitations in using the ZEB-REVO hand-held scanner from GeoSLAM for underground mine mapping. Besides mapping activities, also post-processing of generated point clouds and requirements for georeferencing are discussed. An accuracy assessment is presented by the means of a point cloud comparison, generated by a terrestrial laser scanner from Riegl. Results demonstrate the technical ability and also the limitations of the system ZEB-REVO. Concluding, a critical evaluation of the system is presented.

1 Einführung

Die Methode des Laserscannings wird heute in vielen Bereichen angewendet. Auch wenn das Laserscanning aufgrund verschiedener und durchaus nachvollziehbarer Gründe noch nicht in allen Unternehmen und Büros Einzug gehalten hat und Behörden sich mit der Akzeptanz der Produkte aus Punktwolken oft schwer tun, findet die Methode immer weiter Verbreitung. Ob es das Airborn- oder terrestrische Laserscanning betrifft, in Bezug auf den Aspekt der Digitalisierung und Automatisierung von Prozessen, bietet das Laserscanning auch künftig ein hohes Potenzial. Das Institut für Markscheidewesen und Geodäsie beobachtet seit vielen Jahren die Entwicklungen der Hersteller, um die Möglichkeiten des Einsatzes von Laserscannern für Anwendungen im Bergbau in Betracht zu ziehen. Der ZEB-REVO ist so ein Kandidat. Sein ausgereiftes Konzept, angefangen von Bauform (klein und leicht), seinen technischen Parametern *GeoSLAM (2019)* bis hin zu seinem Messprinzip, machen ihn für den untertägigen Einsatz interessant. Die folgenden Kapitel stellen die Ergebnisse erster Untersuchungen des ZEB-REVO dar.

2 Das Messsystem ZEB-REVO

2.1 Die Handhabung der Hardware

Der ZEB-REVO ist ein handgeführter Laserscanner kombiniert mit einer inertialen Messeinheit (IMU), welcher vom Messenden händisch durch den Raum geführt wird. Der Laserkopf rotiert während der Messung mit einer Geschwindigkeit von 0,5 Hz, sodass, in Kombination mit der Bewegung des Messenden, das System ständig seine Raumlage ändert. Bei einer vom Hersteller angegebenen maximalen Reichweite von 30 m, eignet sich der ZEB-REVO für die Aufnahme von Innenräumen.



Abb. 1: Einsatz des Handscanners im Forschungs- und Lehrbergwerk Reiche Zeche

Das Vorgängermodell ZEB1 wurde 2014 genau für diesen Anwendungsfall konzipiert. Die Lasereinheit ist in der Lage, 43.200 Punkte/Sekunde zu erfassen. Sein Sichtfeld beträgt $360^\circ \times 270^\circ$. Wird der Handscanner aufrecht gehalten, beträgt die Auflösung vertikal $1,8^\circ$ und horizontal $0,625^\circ$. Die Laserklasse 1 ermöglicht ein augensicheres Arbeiten. Verzichtet man auf die Ausbaustufe RT (Real Time), ist der ZEB-REVO in der Schutzklasse IP64 zertifiziert. Mit diesen Hardwarevoraussetzungen bietet sich das Messsystem für untertägige Messaufgaben an. Der ZEB-REVO wiegt 1 kg und ist über ein Kabel mit der Registrier- und Batterieeinheit (ca. 4kg) verbunden, die bequem geschultert werden kann. Abbildung 1 zeigt den Handscanner im untertägigen Einsatz. Weitere technische Parameter sind in *GeoSLAM (2019)* aufgeführt.

Zur Ausstattung des Messsystems gehört ebenfalls eine Videokamera. Wie in Abbildung 1 zu sehen, ist diese unter dem rotierenden Laserkopf angebracht. Parallel zum Scanning wird ein Video aufgezeichnet, welches später im Innendienst dem Auswerter der besseren Interpretation der Punktwolke dient. Leider wird diese vorhandene Bildinformation nicht von GeoSLAM zum Einfärben der Punktwolke verwendet.

2.2 Die Softwarekomponenten von GeoSLAM

Der Hersteller gibt vor, den Handscanner in einer Ruheposition einzuschalten, bei der sich die IMU initialisieren kann (Abbildung 2). Über ein sehr einfaches Ampelsystem von leuchtenden und blinkenden LEDs, ist man über den Mess- und Aufzeichnungsprozess der registrierenden Software hinreichend informiert. Nach der Startphase in der Ruheposition, beginnt mit der Rotation des Scanner-Kopfes und einem zügigen Aufnehmen des Handscanners die Messung und die Aufzeichnung der Rohdaten. Der Messende kann sich voll auf den Messprozess konzentrieren. Der Hersteller empfiehlt, die Messung nach zehn Minuten zu beenden. Hierfür kehrt man zum Startpunkt zurück und schließt in der gleichen Ruheposition den Messvorgang ab.



Abb. 2: Aufnahme des Handscanners aus der Ruheposition

Wie der Name des Herstellers „GeoSLAM“ des ZEB-REVO schon verrät, stammt die Entwicklung des Systems aus der Robotik. Dort werden seit vielen Jahren SLAM-Algorithmen entwickelt und verfeinert. SLAM steht für „Simultaneous Localization and Mapping“, was bedeutet, dass die eigene Positionsbestimmung und die Kartierung (Erfassung) der Umgebung gleichzeitig stattfinden. Die verwendeten Algorithmen können dabei deterministischer und probabilistischer Natur sein. Letztlich besteht die zu lösende Aufgabe darin, die Umgebung zu kartieren und gleichzeitig den Weg des Messenden innerhalb der erzeugten Karte nachzuvollziehen.

Im Ablauf der Messdatenprozessierung, egal ob diese in Echtzeit (Real Time) oder in der Nachbearbeitung (Postprozessing) stattfindet, muss der SLAM-Algorithmus ständig entscheiden, ob er die Informationen (Messwerte), die er bekommt, als eine ihm bekannte Umgebung wahrnimmt, oder ob er eine neue Teilumgebung dem Bestehenden hinzufügen muss. Kommt es hier zu Zuordnungsfehlern, wirkt sich dies auf den Verlauf des Pfades des Messenden aus, sowie auf die Interpretation und Zuordnung weiterer Teilumgebungen. Es kann zu Zuordnungsfehlern kommen, die sich theoretisch unbegrenzt ausweiten. Grob falsche Ergebnisse sind die Folge.

Für eine schnelle Zuordnung und Lösung dieser Mehrdeutigkeiten wird die Graphentheorie benutzt. Für den Messenden ist hier wichtig zu wissen, dass sich die Rückkehr in eine bereits bekannte Umgebung, auch als Kreisschluss bezeichnet, stabilisierend auf die Prozessierung auswirkt. Dies beschleunigt sowohl die Lösungsfindung als auch die Qualität und Genauigkeit des Endergebnisses. Aus diesem Grund ist anzustreben, immer wieder Bekanntes in den Messpfad einzubinden und den Pfad am Ende zu schließen.

Mit Hilfe der vom Hersteller gelieferten Software GeoSLAM Hub, werden die Daten des ZEB-REVO im Innendienst prozessiert. Neben einer automatischen Prozessierung und dem Zusammenführen mehrerer Scans, lassen sich mit GeoSLAM Hub die Daten in verschiedene für Punktwolken übliche Ausgabeformate, wie LAS, E57 oder PLY, konvertieren. Auf die Möglichkeiten der benutzerdefinierten Parametrisierung der SLAM-Verarbeitung wird hier in diesem Beitrag nicht eingegangen.

3 Erfahrungen aus dem untertägigen Messeinsatz

3.1 Referenzierung der Punktwolken

Die mit dem Handscanner einzeln erfassten Punktwolken liegen nach ihrer Prozessierung in einem lokalen Koordinatensystem vor. Der Ursprung des Systems ist in der Startposition zu suchen. In *HÖßELBARTH u.a. (2019)* wurde bereits erläutert, dass eine Referenzierung der mit dem Handscanner erzeugten Punktwolken nur möglich ist, wenn der Anwender zuvor entlang seines Messpfades Referenzobjekte, wie in diesem Fall Kugeln, ausgelegt hat. In der Punktwolke des ZEB-REVO sind diese enthalten, händisch zu suchen und zu detektieren. Als Ankerpunkte dienen sie der Transformation der gesamten Punktwolke in das übergeordnete Koordinatensystem. Wie die Erfassung solch einer Referenzkugel in RiScanPro aussieht, zeigt Abbildung 3.

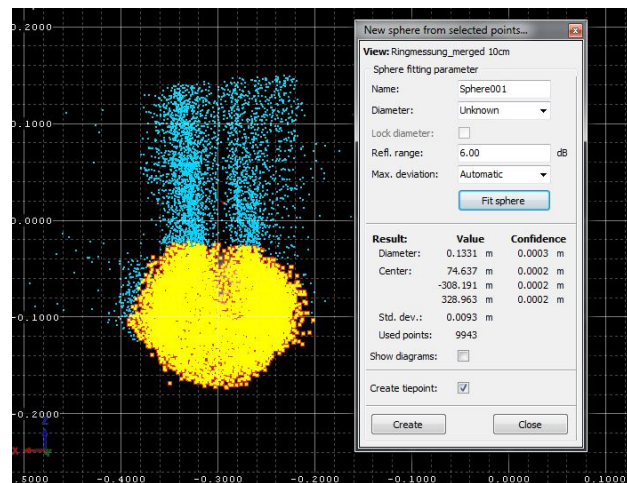


Abb. 3: Detektion einer Referenzkugel in RiScanPro

Die bisher gesammelten Erfahrungen zeigen, dass die Schätzung der 10 cm großen Kugeln als sphärische Objekte in RiScanPro immer zu groß ausfällt. Im Beispiel der Abbildung 3 ergibt sich ein Durchmesser von 13,3 cm. Gut zu sehen ist, dass die Erfassung der Kugeln durch zwei Halbschalen realisiert wird, die sich in der Punktwolke abzeichnen. Einmal durch die Messung auf dem Hinweg von links nach rechts und auf dem Rückweg der Schleife von rechts nach links.

Da der Hersteller zurzeit die Erkennung von Referenzzielen in der Software, also die Erkennung von Kugeln zum Beispiel, nicht vorsieht, ist immer wieder mit diesem Ergebnis zu rechnen.

Als Beispiel für die Referenzierung soll hier die untertägige Vermessung eines geschlossenen Abschnittes im Niveau der ersten Sohle des Forschungs- und Lehrbergwerkes Reiche Zeche gezeigt werden. Um den geschlossenen Ring einer Gang- und Ausrichtungsstrecke mit dem ZEB-REVO zu vermessen, wurden vier Schleifen mit dem Handscanner abgelaufen. Abbildung 4 zeigt mit den vier farbigen Abschnitten die vier Schleifen im Grundriss.



Abb. 4: Darstellung der vier Teilabschnitte des abgelaufenen Messgebietes

Bemerkenswert ist, dass der untere grau eingefärbte Teilabschnitt 1 von ca. 250 m Länge in einem Arbeitsgang erfasst werden konnte. Die Messzeit dieser ersten Schleife von 10 Minuten verdeutlicht das Potenzial der schnellen Objekterfassung des mobilen Systems.

Werden alle vier Schleifen mit der Software GeoSLAM Hub prozessiert und vereint, würden drei Referenzpunkte ausreichen (Abbildung 4), um den gesamten Ring in ein übergeordnetes Koordinatensystem einbinden zu können. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde entschieden, alle vier

Schleifen einzeln zu betrachten, so dass eine unabhängige Transformation aller vier Schleifen in das System des Forschungs- und Lehrbergwerkes Reiche Zeche stattfindet. Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Referenzpunkte. In Grün erkennt man die Stoßkonturen der untertägigen Situation als Schnitt durch die Punktwolke. Sie stammt aus vorangegangenen Messungen eines Riegl-Scanners Z390i aus dem Jahr 2016. Diese Punktwolke ist die Referenzpunktwolke für alle weiteren Betrachtungen.



Abb. 5: Darstellung der Referenzpunktwolke und der 14 Referenzpunkte

Das Vorgehen von Markscheidern und Geodäten, die Güte ihrer Messungen anhand der Restfehler an den Referenzpunkten nach einer Transformation zu bewerten, soll hier ebenfalls gewählt werden. Tabelle 1 zeigt die Restklaffen im Sinne von Verbesserungen.

Tab. 1: Restfehler an den Referenzpunkten im Ergebnis der Transformationen

Schleife Farbe	Name	Sollwert - Istwert			Strecke S [m]	Faktor Soll/Ist
		ΔX [cm]	ΔY [cm]	ΔZ [cm]		
1 Grau	WS0102	86.6	-39.82	3.32	252.3	0.9975
	WS0105	-115.66	13.16	-0.64		0.9975
	WS0106	-128.69	28.94	-0.41		0.9983
	WS0107	-70.71	28.94	-3.68		0.9985
	WS0108	1.34	23.76	-2.82		0.9987
	WS0109	64.51	28.87	-4.43		
2 Lila	WS0102	10.8	-25.18	1.44	35.3	0.9990
	GS0101	11.6	-9.08	-1.11		
3 Gelb	GS0101	18.41	-11.25	-1.03	112.7	0.9998
	GS0103	-11.21	-16.24	-1.92		0.9994
	GS0105	-21.3	-12.28	-0.82		0.9988
	GS0107	-11.03	-8.19	0.41		0.9985
	GS0108	10.01	-14.2	3.67		
4 Türkis	GS0108	20.87	27.96	3.21	139.2	0.9983
	GS0110	14.84	35.28	3.19		0.9992
	GS0112	20.34	35.27	0.63		0.9985
	GS0114	48.21	33.3	-1.52		0.9991
	WS0109	62.68	26.46	-5.68		

Die Sollwerte der Referenzpunkte stammen aus mehrfach gemessenen Ringpolygonzügen. Mit Genauigkeiten der Koordinaten in Lage von unter einem Millimeter und in der Höhe kleiner 1.3 mm, können die Sollwerte als fehlerfrei angesehen werden. Die Istwerte der Koordinaten stammen aus der Schätzung der Kugeln als sphärische Objekte in RiScanPro nach Abbildung 3.

Betrachtet man Tabelle 1 zuerst getrennt nach den vier Schleifen fällt auf, dass die größten Differenzen in der längsten Schleife 1 und die kleinsten Differenzen in der kürzesten Schleife 2 auftreten.

Bis auf Schleife 2 können die Differenzen ΔX als Querabweichung und die Differenzen ΔY als Längsabweichung interpretiert werden. Im Fall der Schleife 2 ist es umgekehrt. Man erkennt, dass der größte Fehleranteil die Querrichtung betrifft und hier die Schleife 1, wo in der Mitte der Schleife die Referenzpunkte WS0105 und WS0106 liegen (Abbildung 5). Abbildung 6 verdeutlicht die extreme Querabweichung am Punkt WS0105.

Mit dem Verlauf der Ringstrecke auf einem Sohlniveau, kommt es im Messpfad kaum zu Änderungen in der Höhe, so dass die Abweichung ΔZ bei allen Schleifen kleiner 6 cm betragen.

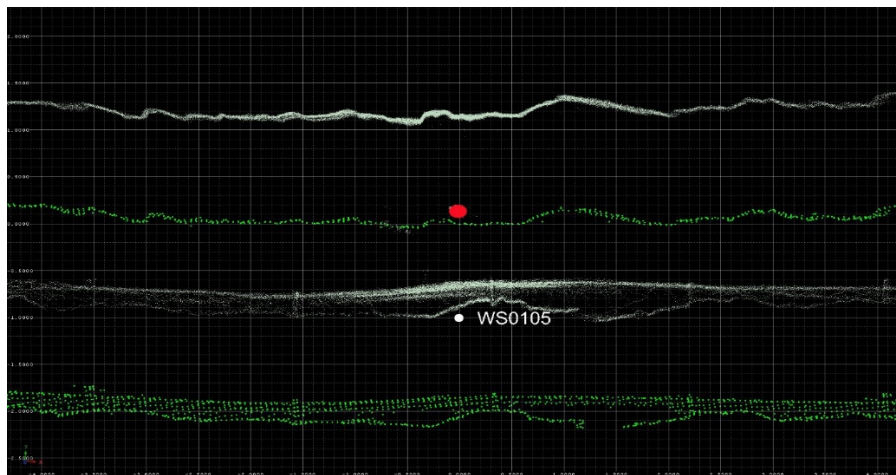


Abb. 6: Abweichung der Punktwolke des ZEB-RVO von der Referenzpunktwolke am WS0105

Die in Abbildung 6 in einem Schnitt dargestellten Punktwolken der Referenz (grün) und des ZEB-REVO (grau) am Punkt WS0105 zeigen ein seitliches Ausweichen der Punktwolke des Handscanners. Dieser Effekt wurde bereits bei den Messungen im Karlstollen *HÖBELBARTH u.a. (2019)* festgestellt. Die Ursachen sind hier im SLAM-Algorithmus zu suchen, der aus folgenden Gründen Probleme mit der Prozessierung hat:

- Die gerade Form der Auffahrung der Ausrichtungsstrecke liefert dem SLAM-Algorithmus kaum geometrische Veränderlichkeit der Umgebung oder in der Richtung.
- Das gleichförmige Profil der Auffahrung liefert dem SLAM-Algorithmus kaum Ankerpunkte für die Orientierung.
- In der Strecke selbst befinden sich keine anderen Objekte, Einbauten oder Gegenstände, die dem SLAM-Algorithmus eine „geometrische Abwechslung“ bieten.
- Aufgrund der Länge der vermessenen Strecke von 250 m, wirkt sich die Drift der IMU als systematischer Fehleranteil immer stärker aus.

In der letzten Spalte in Tabelle 1 wurden Soll- und Ist-Strecken ins Verhältnis gesetzt. Die Ergebnisse führen verdeutlicht den Maßstabsfehler in den Punktwolken des ZEB-REVO. Auch dies wurde bereits in den Betrachtungen von *HÖßELBARTH u.a. (2019)* am Karlstollen festgestellt. Der Maßstabsfehler liegt durchschnittlich bei 0.9987 (1.3mm/m).

3.2 Korrektur der Punktwolken durch Interpolation

Die Erkenntnisse aus 3.1. haben gezeigt, dass die mit dem ZEB-REVO prozessierten Punktwolken in ihrer Genauigkeit zu verbessern sind. In der Ingenieurgeodäsie wird nach DIN 186710-1 die Genauigkeit als ein qualitatives Genauigkeitsmaß beschrieben (Abbildung 7). *MÖSER u.a. (2000)* schreibt dazu: “Die Genauigkeit besteht aus der Richtigkeit und der Präzision, wobei die Richtigkeit die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung des Erwartungswertes an den wahren Wert einer Messgröße und die Präzision die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Streuung von Messwerten unter Wiederholbedingungen ist.“

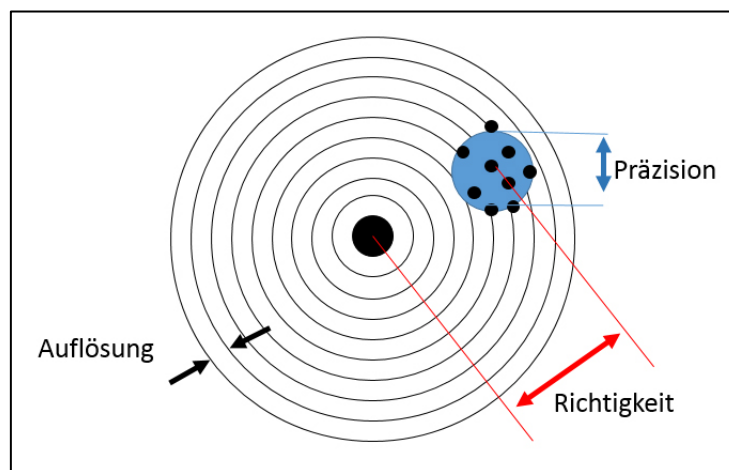


Abb. 7: Darstellung von Präzision und Richtigkeit als Komponenten der Genauigkeit

Betrachten wir diese Teilung des Begriffes Genauigkeit am Beispiel der Abbildung 6 wird klar, dass es den Datensätzen des ZEB-REVO an der nötigen Richtigkeit mangelt. Aus diesem Grund ist es notwendig, in einem zweiten Arbeitsgang die prozessierten Daten des Handscanners zu berichtigen. Hier bietet sich die Methode der multiquadratischen Interpolation (MQI) an. In der deutschsprachigen geodätischen Literatur wurde diese zuerst in der AVN von *HARDY (1972)* und zuletzt in der ZfV von *HEUNECKE (2018)* publiziert. Sie findet vor allem bei der Verteilung von Restklaffen der Datumpunkte nach Transformationen oder bei der Verteilung von Verbesserungen, im Zusammenhang mit Aufgabenstellungen aus der Ausgleichsrechnung, Anwendung.

Im vorliegenden Fall liegt folgende Situation vor: Auf Basis der Polygonzüge sind die Sollkoordinaten der Kugelzentren an den Firstpunkten bekannt (Sollwerte). Gleichzeitig können aus den Punktwolken des ZEB-REVO die Kugeln als sphärische Objekte detektiert werden (Istwerte). Aus der Differenz von Sollwert-Istwert ergibt sich an jedem Stützpunkt die Restklaffe v_i . Die Restklaffen bilden den Spaltenvektor v der Restklaffen, welcher für die Berechnung der Korrekturgröße u nach (1) in der MQI nach *HARDY (1972)* benötigt wird.

$$u_j = s_j^T * S^{-1} * v = c * v \quad 1$$

$$v^T = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6 \ v_7]^T \quad 2$$

Die Stützpunktmatrix S in (1) verkörpert, wie in (3) zu sehen, die Streckenkombinationen der Referenzpunkte untereinander.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} & S_{17} \\ S_{21} & 0 & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} & S_{27} \\ S_{31} & S_{32} & 0 & S_{34} & S_{35} & S_{36} & S_{37} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & 0 & S_{45} & S_{46} & S_{47} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & 0 & S_{56} & S_{57} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & 0 & S_{67} \\ S_{71} & S_{72} & S_{73} & S_{74} & S_{75} & S_{76} & 0 \end{bmatrix} \quad 3$$

HARDY (1972) führt außerdem einen Glättungsfaktor ein, auf dessen Anwendung hier verzichtet wird. Somit ergeben sich in (3) auf der Hauptdiagonalen die Werte Null. Das Produkt aus S und v ergibt den Zeilenvektor c , welcher nur einmal zu berechnen ist.

Die massenhafte Berechnung von u für jeden Messpunkt j der Punktwolke nach (1) beschränkt sich somit auf die Berechnung von s und seine Multiplikation mit c . Der Vektor s enthält die Entfernungen jedes Messpunktes j zu allen Stützpunkten.

$$s_j^T = [s_{j1} \ s_{j2} \ s_{j3} \ s_{j4} \ s_{j5} \ s_{j6} \ s_{j7}]^T \quad 4$$

Wie in diesem Beispiel zu sehen, leistet jeder der sieben Stützpunkte in Abhängigkeit seiner Entfernung zum Messpunkt einen kleinen Korrekturbeitrag, was man als einen gewogenen Fehleranteil verstehen kann.

Die Anwendung der MQI als Korrekturmethode hat den Vorteil, dass sie leicht zu programmieren und der millionenfach auszuführende Rechenschritt zur Bestimmung von (4) und (1) sehr einfach ist. Das im Beispiel der Schleife 1 erzielte Ergebnis am Punkt WS0105 zeigt Abbildung 8 in einem horizontalen Schnitt durch die Punktwolken im Grundriss.

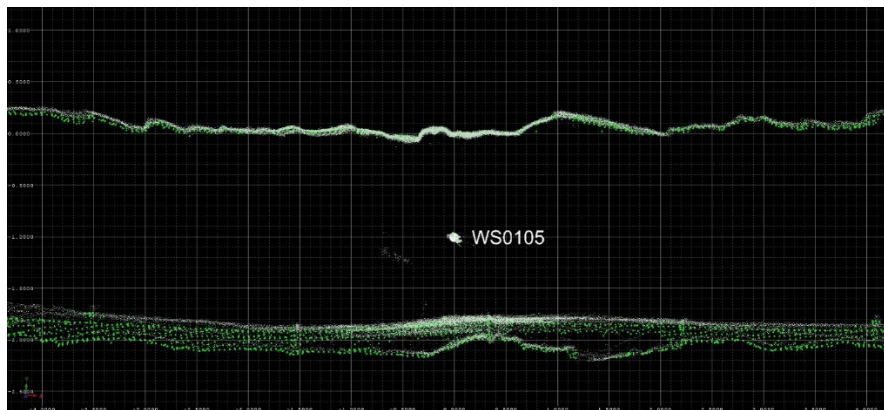


Abb. 8: Die Punktwolke des ZEB-RVO und die Referenzpunkt Wolke am WS0105 nach der MQI

Mit dieser Berichtigung hat sich für alle vier Schleifen die Genauigkeit erhöht, was eine zweite Gegenüberstellung in Abbildung 9 im Übergang von Schleifen 1 (grau) zu Schleife 2 (lila) am Punkt WS0102 unterstreichen soll. Beide Schleifen kommen mit der Referenzpunktswolke (grün) fast zur Deckung (Abbildung 9 rechts).

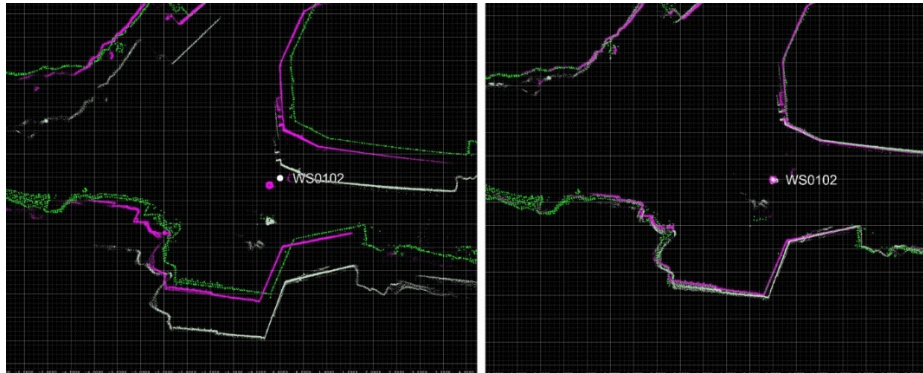


Abb. 9: Gegenüberstellung der Punktwolken vor (links) und nach (rechts) der Anwendung der MQI am WS0102

4 Weiterverarbeitung der 3D- Punktwolke

4.1 Manuelles Bereinigen von Fehlmessungen

In einigen Fällen zeigten sich im Umgang mit dem ZEB-REVO Unstimmigkeiten und Artefakte in den Ergebnissen der prozessierten Punktwolken zu Beginn einer Schleife. Da das Messsystem nach dem Einschalten am Startpunkt weder seine eigene Position noch seine Umgebung kennt, kann es wie in Abbildung 10 zu sehen gelegentlich zu fehlerhaft berechneten Punktwolkenabschnitten kommen. Sind diese groß genug, werden Sie schnell bemerkt und müssen händisch in den Punktwolken bereinigt werden.

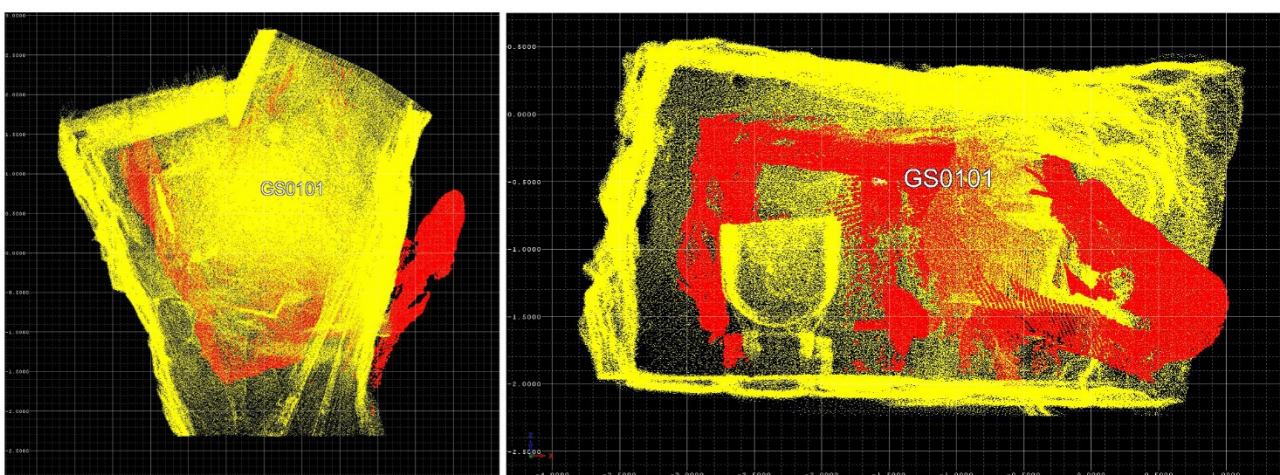


Abb. 10: Ansicht einer fehlerhaften Punktwolke am Startpunkt GS0101 der dritten Schleife links im Grundriss und rechts im Schnitt

Hier hat sich herausgestellt, dass ein sofortiges und zügiges, aber nicht ruckartiges Aufnehmen des Handscanners nach seiner Initialisierung das Auftreten dieser Artefakte reduziert.

4.2 Bewertung der relativen Genauigkeit

Die Angaben des Herstellers zur relativen Genauigkeit von 3 cm wurden bereits in *Höbelbarth (2019)* untersucht und haben sich hier bestätigt. Trotzdem kommt es vor, dass einige Punkte doppelt so große Abweichungen zu ihren Oberflächen besitzen, die sie eigentlich repräsentieren sollen. Dies wiederum gleicht die Masse an Punkten aus. Die so aus den Punktwolken abgeleiteten Objekte, welche für markscheiderische Anwendungen, zum Beispiel das Bestimmen von Streichen und Fallen von Klüften, relevant sind, können hinreichend exakt detektiert werden. Die folgende Tabelle 2 soll das am Beispiel von drei Flächen zeigen.

Wie unter 2.1. bereits ausgeführt, kann die Farbinformation der Videokamera gegenwärtig nicht als Farbinformation für die 3D-Punktwolke verwendet werden. Auch wenn aufgrund der schlechten Lichtverhältnisse unter Tage ein RGB Wert für einen 3D-Punkt kaum von Nutzen sein dürfte, wäre die Umsetzung einer farbigen Punktwolke wünschenswert.

Tab. 2: Gegenüberstellung der Ergebnisse des VZ400i mit den Ergebnissen des ZEB-REVO am Beispiel der Erkennung von drei Ebenen

		VZ400i	Handscanner		Einheit
			1	2	
Fläche 1 Größe: 30 x 30 cm	Punkt:	2972	3357	4662	Anzahl
	Min. Distanz:	-6	-21	-72	mm
	Max. Distanz:	5	32	108	mm
	Stan. Abw.:	1.5	7.9	21.5	mm
	Neigung	84.5	85.2	82.8	grad
	Richtung	341.1	341.2	339.9	grad
Fläche 2 Größe: 15 x 40 cm	Punkte:	2230	2729	2389	Anzahl
	Min. Distanz:	-2	-25	-38	mm
	Max. Distanz:	3	38	34	mm
	Stan. Abw.:	0.8	10.2	8.7	mm
	Neigung	89.9	89.5	89.8	grad
	Richtung	338.2	338.3	338.6	grad
Fläche 3 Größe: 50 x 70 cm	Punkte:	11269	9006	3951	Anzahl
	Min. Distanz:	-7	-32	-42	mm
	Max. Distanz:	6	31	29	mm
	Stan. Abw.:	1.5	6.1	8.0	mm
	Neigung	1.8	1.5	1.5	grad
	Richtung	99.9	120.4	119.0	grad

Gegenüber anderen Laserscannern, die Intensitätswerte bzw. die Reflektivität liefern, oder mit einer ausgereiften Registrierung eine Trennung des Signals in Einzel-, First-, Last- und Zwischen-Impulse vornehmen, beschränkt sich die 3D- Punktwolke des ZEB-REVO auf die 3D-Koordinaten

für jeden Punkt. Somit kann für die Bereinigung der Daten von Fehlmessungen und ihre Weiterverarbeitung nur auf geometrische Filter zurückgegriffen werden.

4.3 Detektion von Stoßkonturen

Der große Vorteil des mobilen Handscanners ZEB-REVO ist es, in kürzester Zeit schnell und vollständig geschlossene Räume oder untertägige Situationen aufzunehmen, soweit sie durch den Messenden betreten werden können. Dieser Vorteil der schnellen Messerwerterfassung sollte mit einer schnellen Datenauswertung einhergehen. An dieser Stelle, nämlich nach der Referenzierung der Punktwolken, hören die Konzepte einiger Hersteller der Hardware auf. Im Fall des ZEB-REVO ist das nicht anders. Der Anwender ist darauf angewiesen, sich einen bunten Strauß an Softwareprodukten bereitzuhalten, um für die jeweilige Aufgabenstellung die passende Software parat zu haben. Einige dieser Lösungen bieten eine komfortable Volumenberechnungen, andere eine automatisierte Generierung von Schnitten oder/und eine ausgereifte Oberflächenvermaschung.

Die Daten des ZEB-REVO bieten sich, gerade in Bezug auf die bisherigen Erfahrungen, für die Ableitung von Stoßkonturen an. Das folgende Beispiel in Abbildung 11 zeigt eine Möglichkeit der Gewinnung dieser Informationen aus Punktwolken.

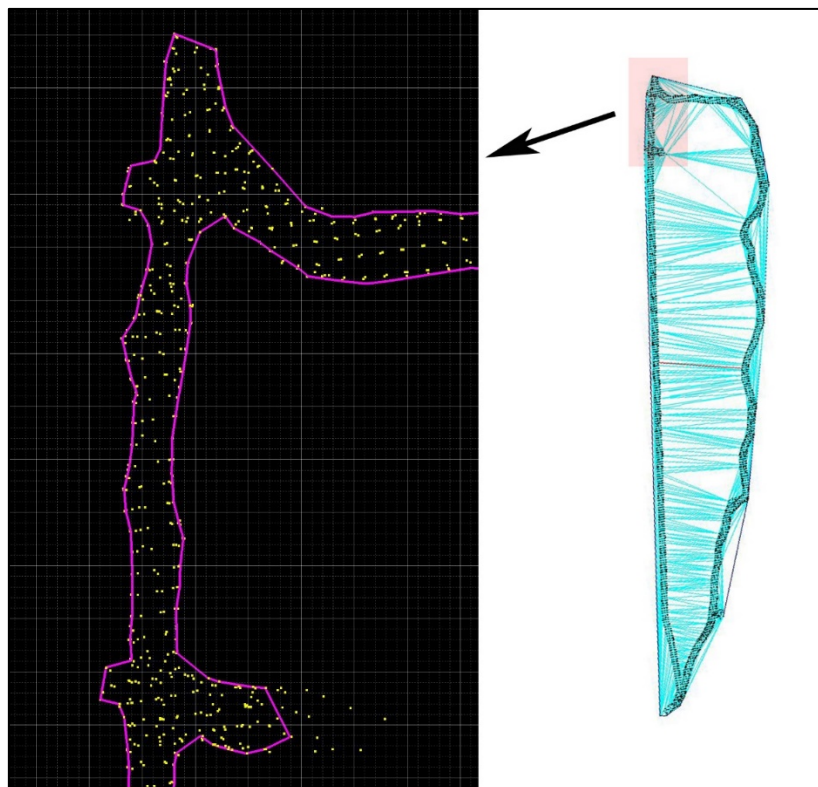


Abb. 11: Darstellung der Octree gefilterten Punktwolke mit der erzeugten Vektorgrafik der Stoßkontur des Grubengebäudes links, sowie die automatisierte Dreiecksvermaschung rechts

In den meisten Fällen beginnt die Weiterverarbeitung von Punktwolken mit ihrer Ausdünnung auf ein verträgliches Maß an Punkten. Da der ZEB-REVO nur die 3D-Information liefert, können unabhängig von der Möglichkeit des händischen Bereinigen auch nur geometrische Filter zum Ausdünnen der Punktwolke zum Einsatz kommen. In dem hier vorgestellten Beispiel wurde die Punkt-

wolke des bisher betrachteten Messgebietes (Abbildung 4) durch einen Octree-Filter reduziert. Der Filter arbeitet so, dass der 3D-Datensatz in Form einer Baumstruktur in Quader und diese wieder in acht Teilquader usw. zerlegt werden. Der Anwender bestimmt mit der Kantenlänge des kleinsten Teilquaders den Auflösungs- und Ausdünnungsgrad. Im hier gezeigten Beispiel wurde die Kantenlänge von 1m gewählt, so dass in einem räumlichen Abstand von ca. 0.5 m alle Punkte im Schwerpunkt vereint werden. Die Originaldaten der vier Schleifen wurden so von ca. 66 Millionen Punkte auf ca. Sechstausend reduziert. Eine Software wie CAPLAN, die nicht für Punktwolken ausgelegt ist, kann jetzt die Daten weiterverarbeiten. Links in Abbildung 11 veranschaulichen die gelben Punkte die ausgedünnte Punktwolke nach der Octree-Filterung.

Verwendet man jetzt in CAPLAN das Modul zur Generierung von DGM, erfolgt eine automatische Vermaschung des Gebietes (Abbildung 11 Rechts). Definiert man als Außengrenze des DGM die offenen Grubenbaue, ist die Außengrenze des DGM durch den Anwender interaktiv einzurücken. Dies hat im Beispiel der Abbildung 11 ca. 20 Minuten in Anspruch genommen. Mit der Konvertierung der Außenlinie als 3D-Polylinie und dem Export als DXF-File, kann das Ergebnis als Vektorgrafik in jedes CAD übernommen werden. Zur Prüfung des Ergebnisses aus CAPLAN wurde es in RiScanPro zurückgespielt (Abbildung 11 links). Lila zeigt die Vektorgrafik der Stoßkonturen im Grundriss.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der hier vorgestellte Beitrag beschäftigte sich mit dem Handscanner ZEB-REVO. Die in den Kapiteln 3 und 4 angestellten Untersuchungen führten zu einer kritischen Bewertung des Systems. Im Wesentlichen kann das Resümee gezogen werden, dass aufgrund der hohen Schutzklasse und der einfachen Handhabung der Hardware, der ZEB-ROVO ein hervorragendes Instrument zur schnellen Aufnahme beengter untertätiger Situationen ist.

Die untertägige Situationen und hier vor allem die des Altbergbaus machen es schwer, die vom Hersteller angegebenen absoluten Genauigkeiten der Punktwolke zu halten. Da die prozessierten Punktwolken des ZEB-REVO in einem lokalen Koordinatensystem vorliegen, sind diese über Referenzpunkte durch Transformation in übergeordnete Systeme einzubinden. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Restfehler an den Referenzpunkten mehrere Dezimeter betragen und nicht zu tolerieren sind. Aus diesem Grund ist eine Berichtigung der Punktwolke zur Genauigkeitssteigerung notwendig. Erst dann besitzen die Punktwolken eine Güte, die für die Ableitung risswerkrelevanter Informationen, wie die Kartierung von Stoßkanten, nötig ist. Ein abschließendes Beispiel zeigt eine Möglichkeit der Punktwolkenverarbeitung.

Die bisherigen Untersuchungen wurden mit Leihgeräten der Firma ALLTERRA und Laserscanning-Europe durchgeführt. An dieser Stelle möchte sich der Autor recht herzlich bei beiden Firmen für die Unterstützung bedanken.

Das Institut für Markscheidewesen und Geodäsie plant im Jahr 2019 die Anschaffung eines eigenen Instrumentes, so dass offen gebliebene Fragestellungen weiterverfolgt werden können. Offen geblieben sind zum Beispiel die Möglichkeiten der Einflussnahme des Messenden auf den Erfolg des SLAM-Algorithmus, oder Untersuchungen zur Erfassung feuchter Oberflächen bis hin zu Wasserflächen. Letztlich soll das Instrument der vollständigen Aufnahme der Bereiche der historischen

Grubenfelder im Forschungs- und Lehrbergwerk Reiche Zeche dienen. Dort, wo beengte Verhältnisse den Einsatz des Riegl VZ400i nicht zulassen, sollen Datensätze des ZEB-REVO eine vollständige Erfassung des Grubengebäudes sicherstellen.

LITERATURVERZEICHNIS

GeoSLAM, : <https://geoslam.com/zeb-revo/> (abgerufen am 10.Januar.2019), 2019

Hardy, R.: *Geodetic applications of multiquadratic analysis*. Allgemeine-Vermessungs-Nachrichten (AVN), 10/1972, S. 398-406, 1972

Heunecke, O. : *Nachbarschaftstreue Anpassung mittels bilinearer Filterung*. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), 3/2018, S. 177-184, 2018

Höbelbarth, D.; Richter, O.; Martin, C.; Martienßen, T. & Wandinger, M.: *Erste Erfahrungen mit dem handgeführten Laserscanner ZEB-REVO bei Vermessungsarbeiten im Altbergbau am Südtiroler Schneeberg*. Tagungsband zum 18. Altbergbau-Kolloquium 8. bis 10. November 2018 in Wieliczka, Polen. Freiberg/Nossen, S. 221–234, 2018

Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H.; Werner, H.; *Handbuch der Ingenieurgeodäsie, Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S.104, 2000